

AUS DEM RÖNTGENINSTITUT DER UNIVERSITÄT BERN

Dir. Prof. Dr. A. Zuppinger

Arbeit unter Leitung von Privatdozent Dr. W. Minder

Versuche über den Verlauf der Strahlen- wirkung auf Modellsubstanzen

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER

WÜRDE EINES DOCTOR MEDICINAE DENTIIUM
DER UNIVERSITÄT BERN

vorgelegt von

KARL HUBLER

aus Bätterkinden (Bern)



Zürich 1950

Dissertationsdruckerei Leemann AG.

AUS DEM RÖNTGENINSTITUT DER UNIVERSITÄT BERN

Dir. Prof. Dr. A. Zuppinger

Arbeit unter Leitung von Privatdozent Dr. W. Minder

Versuche über den Verlauf der Strahlen- wirkung auf Modellsubstanzen

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER

WÜRDE EINES DOCTOR MEDICINAE DENTIIUM
DER UNIVERSITÄT BERN

vorgelegt von

KARL HUBLER

aus Bätterkinden (Bern)



Zürich 1950

Dissertationsdruckerei Leemann AG.

Von der medizinischen Fakultät der Universität Bern auf
Antrag von Herrn Prof. Dr. Zuppinger und Herrn P.-D. Dr.
W. Minder zum Druck als Dissertation genehmigt.

Bern, den 5. Juli 1950.

Der Dekan der medizinischen Fakultät:
Prof. Dr. *Hallauer*.



1. Einleitung und Allgemeines

Bei der Behandlung vieler Krankheiten ist der Arzt heute noch dazu verurteilt, sich sowohl in der Wahl der Medikamente, wie auch in deren Dosierung von rein empirisch ermittelten Erfahrungen leiten zu lassen, ohne über die qualitativen und quantitativen Vorgänge, welche die Medikamente im Organismus auslösen, näher Bescheid zu wissen. Die Kenntnis vom qualitativen, vor allem aber vom quantitativen Geschehen wäre für eine durchschlagkräftige Therapie oft aber von eminenter Wichtigkeit, würde doch nach Ermittlung eben all dieser Vorgänge die Behandlung gewisser Krankheiten nicht mehr einfach einem Tappen im Ungewissen gleichkommen, sondern einer Beherrschung und Steuerung der biologischen Reaktionen mit wohlbekannten und dosierbaren Mitteln und Kräften.

Für eine zweckmäßige Anwendung der Strahlen in der Therapie müssen zwei wichtige Voraussetzungen erfüllt sein, nämlich sowohl die genaue Kenntnis der quantitativen Beziehungen von Strahlendosis und Strahlenwirkung wie auch der Vorgänge innerhalb des Objekts vom Zeitpunkt der Strahleneinwirkung bis zum Zeitpunkt, in dem ein Effekt der Beobachtung zugänglich wird.

Die Bedeutung einer zielbewußten, genauen Dosierung der Strahlen geht deutlich aus der Beobachtungstatsache hervor, daß der durch eine z. B. niedrige Dosis erreichte gewünschte Effekt bei relativ geringer Steigerung derselben unter Umständen ins Gegenteil umschlagen kann.

Die Strahlenbiologie hat es sich zur Aufgabe gemacht, den Wirkungsmechanismus, welcher durch das Aufnehmen von strahi-

lender Energie durch das biologische Objekt in demselben ausgelöst wird, anhand von Einzelvorgängen aufzuklären. Sie führt uns schließlich zu den Bausteinen der Natur, den Molekülen und Atomen; denn die primäre Wechselwirkung zwischen Strahlung und Objekt ist in allen Fällen ein atomarer oder molekularer Vorgang, da die Strahlenschwächung an den Atomen oder Molekülen eines Bestandteils des bestrahlten Objektes erfolgt. Dabei können mehrere solche Veränderungen miteinander vorkommen und sich unter Umständen gegenseitig beeinflussen.

Anfänglich versuchte man durch direkte Bestrahlung von lebenden Zellen darüber Aufschluß zu erhalten, erkannte aber bald, daß die Reaktionsmöglichkeiten in einer Zelle, in welcher eine unbekannte Zahl von verschiedensten chemischen Substanzen in einer sicherlich sinnvollen, jedoch uns nicht restlos bekannten Wechselwirkung stehen, viel zu mannigfaltig sind, als daß man die durch die aktinische Energie verursachten Reaktionen daran hätte studieren können. Es wurde beobachtet, daß zwischen der Strahlenwirkung und dem Manifestwerden einer Reaktion am biologischen Objekt gewöhnlich eine beträchtliche Latenzzeit besteht. Erwähnt sei hier nur als Beispiel die nach ca. erst zwei bis drei Wochen später auftretende Erscheinung des Hauterythems nach Röntgenbestrahlung. Die Annahme liegt nahe, daß während diesem Zeitintervall eine Reihe von Reaktionen abläuft, von denen vorerst nur das Endresultat der Beobachtung zugänglich ist. Es wäre aber von ganz besonderem Interesse, die unmittelbar nach der Bestrahlung auftretende Reaktion des biologischen Objektes, das heißt den sogenannten biologischen Primäreffekt zu kennen, da von ihm alle weiteren Erscheinungen mehr oder weniger abhängig sein müssen. Reiz ohne Reizbeantwortung ist mit dem Leben nicht vereinbar und der biologische Primäreffekt ist nichts anderes als die erste Reizbeantwortung der lebenden Zelle, die dem physikalischen Primäreffekt, der den Reiz repräsentiert, unmittelbar folgt, indem die aufgenommene Strahlungsenergie den Chemismus des biologischen Objektes beeinflußt. All die Veränderungen der lebenden Substanz unter Einfluß von Strahlen, so verschieden sie in ihrer Erscheinungsform sind, haben denselben Ausgangspunkt: den quantenhaften Schwächungs-

akt der Strahlung beim Durchgang durch das biologische Objekt = Ursache und Ausgangspunkt jeder Strahlenwirkung, also auch der biologischen. Physikalischer Primäreffekt bedeutet: Ionisation in je einem umschriebenen Bezirk, wobei sie ca. die Hälfte der im Objekt zurückgehaltenen Röntgenstrahlenenergie darstellt, während die andere Hälfte in Anregungen umgesetzt wird. Letztere stellen jedoch einen wohl weniger bedeutsamen Vorgang im biologischen Objekt dar als die durch die Elektronenaustreibung entstehende Ionisation. Auf Grund dieser Erkenntnis kann man nach *R. Glocker* (3) die Messung der Strahlenwirkung anhand der Ionisation vornehmen unter vorläufiger Vernachlässigung der übrigen in Anregungen umgewandelten Energie. Der Messung des wirksamen Anteils der Strahlung wird man also am besten gerecht durch die Messung der Ionisation der Luft und der Übertragung der dabei erhaltenen Werte auf die biologische Substanz. Dieses Vorgehen ist insofern berechtigt, als die Ionisation der Luft relativ leicht und genau in sehr weiten Grenzen meßbar ist und aus den Schwächungsverhältnissen abgeleitet werden darf, daß auf die Masseinheit bezogen die Zahl der durch die Strahlung gebildeten Ionen in der Luft und in der biologischen Substanz dieselbe ist. Auf diese Überlegung gründet sich die Einheit der Röntgenstrahlendosis: Das internationale Röntgen (1r) ist diejenige Röntgenstrahlenmenge, die in 1 ccm Luft von Normalzustand (760 mm Hg + 0° Celsius) eine solche Ionisation erzeugt, daß unter Ausschaltung äußerer Einwirkungen eine Elektrizitätsmenge von einer elektrostatischen Einheit transportiert wird. Durch 1r werden $1,61 \cdot 10^{12}$ Ionen/g gebildet. *W. Duane* und *O. Scheurer* (1) bewiesen in Versuchen, wobei sie Wasser durch α -Strahlen zersetzten, die Berechtigung obgenannter Meßmethode durch Umrechnung. Auch *L. Holzapfel* und *P. Günther* (4) erzielten mit Röntgenstrahlen die gleichen Ergebnisse.

Da die Reizbeantwortung in strengem Sinne davon abhängt, welches die Art und Stärke des Reizes selber ist, besteht die Aussicht, daß man sich nach genügender quantitativer und qualitativer Kenntnis dessen, was die Strahlung bei ihrem Durchgang durch ein einfaches chemisches System verursacht, per deductionem eine Erklärung des biologischen Primäreffektes zurechtlegen kann;

durch Übertragung der aus Modellversuchen erforschten allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten der primären Strahlenwirkung auf das biologische Objekt kann man sich einen Einblick in die Einzelheiten des ganzen Reaktionsmechanismus verschaffen, der durch den physikalischen Primäreffekt ausgelöst im biologischen Objekt mit dem biologischen Primäreffekt als erstes Glied einer mehr oder weniger langen Kette abläuft; denn es bestehen keine zwingenden Gründe für die Annahme, daß die Strahlenwirkung in biologischen Systemen nach einem grundsätzlich andern Mechanismus verlaufen muß als diejenige an Modellsystemen.

Die Strahlenwirkungen an biologischen Objekten können morphologischer, physiologischer wie auch genetischer Natur sein.

Auch hier gilt die biologische Regel von *Arndt-Schulz*:

Kleine Reize fördern, große hemmen, größte lähmen.

Zudem ist zu beachten, daß die Empfindlichkeit des biologischen Objekts vom Entwicklungsstadium abhängig ist. Die Dosiswirkung weist aber auch von einem biologischen Objekt zum ändern für dieselbe Erscheinung große Unterschiede auf. Die Strahlenbiologie berührt sich mit großen Gebieten der Wissenschaften, wovon nur einige genannt werden sollen wie Strahlentherapie, Biochemie oder die *Genmutationen*, wobei die Einwirkung kurzweiliger Strahlen auf Keimzellen oder befruchtete Eier als Ursache für das Auftreten solcher Veränderungen bekannt ist. Besonders an der *Drosophila melanogaster* haben zahlreiche diesbezügliche Untersuchungen Aufklärung in der Frage der spontanen Änderung von Erbfaktoren gebracht, wobei wohl die tiefsten Probleme des Lebens berührt werden.

Es gelingt, mit Strahlungen ein- oder mehrzellige biologische Systeme in ihrer Entwicklung zu hemmen oder sogar abzutöten; es entstehen Änderungen des Grundumsatzes, der Wasserstoffionenkonzentration (z. B. verschieben von pH des Blutes gegen sauer), der Permeabilität der Zellwände; Atrophie der Haut und Schleimhäute, Epilation, Ödeme, später Tod. Auch Änderungen der Viskosität des Plasmas und der Lichtbrechung konnten festgestellt werden. Die Ursachen, die zu diesen Erscheinungen führen, sind heute noch nicht aufgeklärt und bilden die Hauptaufgabe der Strahlenbiologie.

2. Problemstellung

Bei allen chemischen Strahlenreaktionen sind die umgesetzten Stoffmengen sehr gering. Jedenfalls sind die Strahlendosen, die notwendig sind, um meßbare Substanzmengen umzuwandeln sehr viel größer als diejenigen, die bei biologischen Objekten teilweise sehr auffällige Veränderungen hervorrufen. Aus dieser Tatsache folgt, daß zur Feststellung und Messung des Strahleneffektes bei Modelluntersuchungen nur die empfindlichsten Meßmethoden brauchbar sind.

Durch bedeutende Verfeinerungen der Untersuchungsmethoden wurde es möglich, selbst nach kleinen Expositionszeiten über die durch die Strahlung verursachten Veränderungen im Versuchsobjekt hinreichend genaue Messungen anzustellen.

Bei den zur Aufklärung des biologischen Primäreffektes angestellten Versuchen treten vor allem zwei Fragen in den Vordergrund:

- a) Die Frage nach der zur Ionisation verbrauchten aktinischen Energiemenge einerseits und die Rolle des nicht zur Ionisation verbrauchten Energieanteils andererseits.
- b) Die Frage nach den Bestandteilen, die besonders von den Strahlen angegriffen werden.

Die erste Frage ist so komplex, daß sie nur nach streng systematisch durchgeführten Untersuchungen an einer großen Zahl von chemisch möglichst einfachen Versuchssubstanzen einen Einblick in den Strahlungs-Energiehaushalt gestattet.

Tritt eine Strahlung mit Materie in eine Wechselwirkung, so gilt das Grotthus-Draper'sche Gesetz, wonach der im bestrahlten Objekt zurückgehaltene Strahlungsanteil für die Provokation der Strahlenwirkung verantwortlich gemacht werden muß. Bekannterweise wird die biologische Strahlenwirkung für Strahlen von der Wellenlänge, wie sie dem Lichtspektrum inklusive Infrarot und Ultraviolett entsprechen, durch Anregung der Atome und Atomgruppen verursacht.

Auch um die Angriffspunkte, an denen die Röntgenstrahlen besonders angreifen, aufzuklären, wurde man dazu gezwungen,

möglichst einfache chemische Systeme den Strahlen zu exponieren, d. h. Modelle, deren Reaktionsmöglichkeiten von vorneherein sehr stark eingeschränkt sind oder bei denen nach der Kenntnis der Reaktionsmöglichkeiten überhaupt nur eine Reaktion wahrscheinlich sein muß. Dieses eine Reaktionsprodukt aber sollte nach Möglichkeit auch noch in kleinsten Mengen einer möglichst genauen Messung zugänglich sein und keine Kettenreaktionen zur Folge haben.

Erst wenn mit diesen Voraussetzungen Versuche unter verschiedenen Versuchsbedingungen durchgeführt werden, wie beispielsweise durch Variieren der Konzentration oder Temperatur, erhält man die Übersicht über die gegenseitigen Zusammenhänge von Ursache und der als biologischer Primäreffekt bezeichneten Wirkung.

Die Theorie von *R. Sievert* (14) und *J. v. d. Werff* (18) für biologische Objekte sagt aus (Voraussetzung: Das biologische Objekt ist ein System von vielen Stoffen, Zuständen und Prozessen, die sich alle in einem dynamischen Gleichgewicht befinden): „Die Änderung eines Gliedes dieses Gleichgewichts bedingt die Änderung der andern“.

Einige derartige Modelluntersuchungen liegen heute vor und zeigen teilweise auch schon gemeinsame Charakteristika.

The Svedberg und *S. Brohult* (15) ist es gelungen, die Eiweißmoleküle Hämoglobin von *Helix pomatia* sowie Hämoglobin und Serumalbumin durch α -Strahlen in kleinere Einheiten zu spalten, wobei bei der ersten Substanz Bruchstücke mit genau definiertem Molekulargewicht gebildet wurden.

Am Röntgenologischen Institut der Universität Bern wurden auch bereits eine ansehnliche Reihe solcher Substanzen bestrahlt, denen durch ihr Vorkommen im menschlichen Organismus ein besonderes Interesse zukommt.

F. Wegmüller (16) gelang es zu beweisen, daß auch das Molekül der Thymonukleinsäure durch Röntgenstrahlen in bedeutend kleinere Einheiten zerlegt wird. Gerade diese Beispiele weisen darauf hin, daß die Strahlenbiologie in der für die Medizin so wichtigen Eiweißchemie vielleicht noch wesentliche Beiträge liefern können.

Es darf gesagt werden, daß man in der Aufklärung des Wirkungsmechanismus der Röntgenstrahlen wohl ein Stück vorangekommen ist; jedoch steigt auch hier mit der Zahl der der Materie abgerungenen Antworten proportional die Anzahl der neu sich aufdrängenden Fragen.

Aus der großen Reihe von Versuchen geht hervor, daß zwischen der Strahlendosis und der Menge des umgesetzten Reaktionsprodukts einfache Beziehungen bestehen. *H. Fricke* und *St. Morse* (2) stellten fest, daß für die Oxydation von Ferrosulfat zu Ferrisulfat in wässriger Lösung bis zur vollständigen Oxydation ein linearer Zusammenhang zwischen Dosis und umgesetzter Menge Ferroionen besteht, ferner daß die Reaktion weitgehend wellenlängenunabhängig verläuft. Außerdem wurde bei dieser Gelegenheit die Beobachtung gemacht, daß die Zahl der durch die Strahlung oxydierten Ferroionen innerhalb den Grenzen von $m/5000$ bis $m/25\,000$ von der Konzentration unabhängig ist.

In der Arbeit von *A. Liechti*, *W. Minder* und *F. Wegmüller* (7) konnte gezeigt werden, daß Linearitäts- und Konzentrationsunabhängigkeit sogar in den Grenzen von $m/5$ bis $m/25\,000$ bestehen bleiben. Bei den zahlreichen Fällen von konzentrationsunabhängigem Effekt muß die Energiewanderung als sicher gelten, *W. Minder* (8). Diese Konzentrationsunabhängigkeit bestätigt die Vermutung von *O. Risse* (12), wonach z. B. die Oxydation von Ferroion durch kurzwellige Strahlen nicht an diesem direkt, sondern auf dem Umweg über das Lösungsmittel erfolgt.

Im Versuch von *F. Wegmüller* (16) mit Äthylenbromid konnte gezeigt werden, daß die Bromwasserstoffbildung überhaupt nur in Gegenwart von Wasser vor sich geht. Diese Feststellung diene u. a. als Beweis, daß die Strahlung nicht direkt an der Substanz als solcher angreift, sondern daß sie das Lösungsmittel Wasser aktiviert, das wiederum an die reaktionsfähigen Moleküle herangebracht wird. Es besteht kein Zweifel, daß die Röntgenstrahlen auf das Wasser ionisierend wirken, wodurch zahlreiche Spaltungsprodukte gebildet werden müssen. Sicher ist dabei die Dissoziationskonstante des Wassers vorübergehend erhöht. Das ergibt sich aus der Tatsache der Ionisation durch kurzwellige

Strahlen ganz allgemein. Nach *J. Weiß* (17) besteht das aktivierte Wasser aus freien H- und OH-Radikalen, wovon letzteres sehr reaktiv als Elektronenakzeptor ist. Auf Grund dieser Tatsache wird es als verantwortlich dafür angesehen, daß fast alle organischen Verbindungen durch Bestrahlung in wässriger Lösung zersetzt werden. Fraglich ist es aber, ob ein solcher Effekt im Wasser selbst überhaupt durch eine Messung erfaßt werden kann.

H. Ritter (13) versuchte mit gutem Wasserdestillat eine Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit festzustellen. Die Resultate ergaben jedoch keine Systematik in der Veränderung des spezifischen Widerstandes. Eine eventuelle Änderung der spezifischen Leitfähigkeit des Wassers konnte demnach durch die verwendete Apparatur und mit dem verwendeten Wasser nicht erfaßt werden. Sie betrug auch bei hohen Röntgenstrahlenintensitäten von ca. 2500 r/min. bedeutend weniger als $10^{-6} \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. In dieser Größenordnung liegt aber der erreichbare Grenzwert der spezifischen Leitfähigkeit des Wassers überhaupt.

Es wurden auch Versuche angestellt, um den Einfluß der Temperatur zu erforschen. Die Hydrolyse von Chloroform in fester Phase war nicht zu erreichen (*W. Minder* (9)); ebenso blieb die Oxydation einer zum Gefrieren gebrachten wässrigen Lösung von Ferrosulfat aus (*W. Minder* und *A. Liechti* (11)). Auch die Zersetzung von Eis durch α -Strahlen (*W. Duane* und *O. Scheurer* (1)), wie durch Röntgenstrahlen (*P. Günther* und *L. Holzappel* (4)) erwies sich als unmöglich. Aus diesen Ergebnissen darf geschlossen werden, daß der Energietransport an die freie Beweglichkeit der Moleküle gebunden ist. Es war angesichts des mengenmäßig größten Vorkommens des Wassers als Komponente der lebenden Substanz naheliegend, seine Rolle als Energieüberträger vom Modellversuch auf das biologische Objekt zu übertragen (*W. Minder* und *A. Liechti* (10)). Ein Beispiel sei erwähnt, um die bedeutende Rolle des Wassers als Komponente des biologischen Strahlengeschehens klarzumachen: Bei der Bestrahlung der Samen von *Vicia faba* und Gerste fanden *O. Jüngling* (5) und *E. Wertz* (19), daß im getrockneten Zustand die zehnfache Dosis nötig war, um den gleichen Effekt zu erzielen wie mit gequollenen Samen.

Die bis jetzt gemachten Untersuchungen der quantitativen Beziehung von Dosis und Wirkung zum Teil am Modell, zum Teil am biologischen Objekt ergaben die interessante Tatsache, daß die Menge des Reaktionsprodukts der verschiedenen Versuchssubstanzen in Abhängigkeit gebracht mit der Bestrahlungsdauer nur vier Kurventypen ergaben.

Bei der Zersetzung von Chloroform durch Röntgenstrahlen, bei der Hydrolyse von Äthylenbromid in wässriger Lösung in der Untersuchung von *F. Wegmüller* (16), sowie bei Versuchen mit Bromoform, Methylenchlorid, Aceton u. a. in vorliegender Arbeit, resultierte bei kleineren Strahlendosen eine geringere Ausbeute, bezogen auf die Dosiseinheit, als bei höhern Dosen, so daß die Kurve des Anstiegs der umgesetzten Substanzmenge erst nach einer bestimmten Anfangsdosis (5—10 000 r) linear verläuft. Die Tatsache, daß die Wirkung nicht immer proportional zur Dosis zunimmt, sondern daß in vielen Fällen eine Exponentialfunktion vorliegt, weist hin auf die Kompliziertheit im Ablauf des durch die Einwirkung von Strahlen in Gang gesetzten Mechanismus im Objekt.

In der vorliegenden Arbeit lautete das Problem, Versuche über den Verlauf der Strahlenwirkungen auf folgende Modellsubstanzen anzustellen:

Bromoform CHBr_3 ; Isopropylbromid
Methylenchlorid ; Aceton $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$

Mit andern Worten, organische Substanzen, die durch Wasser hydrolytisch spaltbar sind, rein oder in wässriger Lösung zu bestrahlen und die Strahlenwirkung durch Vergleich des Ausmaßes der Hydrolyse mit und ohne Bestrahlung zu bestimmen.

Ferner war die Abhängigkeit des spezifischen Leitungswiderstandes K von der Temperatur zu untersuchen.

3. Beschreibung der Versuchsmethode

Als Meßmethoden für den durch die Bestrahlung entstandenen Stoff dienten bei den vorstehenden Versuchen bisher Titration, ferner Kolorimetrie, pH-Messung und Nephelometrie. Alle diese Methoden haben aber ganz bestimmte Grenzen, die durch die Methode selber gegeben sind.

Bei hochmolekularen Substanzen wurden auch Viskositätsmessungen verwendet und *The Svedberg* und *S. Brohult* haben die Eiweißspaltung durch α -Strahlen mit Hilfe der Ultrazentrifuge kontrolliert.

Da die Substanzmengen, die durch Röntgenstrahlen umgesetzt werden können, unter praktisch realisierbaren Bedingungen äußerst klein sind, ergibt sich von selbst die Forderung nach einer sehr empfindlichen Meßmethode mit hinreichender Genauigkeit, d. h. es sollen bei absolut kleinem Effekt auch noch Unterschiede von wenigen Prozenten sicher erfaßt werden können. Sodann muß die Messung über einige Größenordnungen dieselbe Genauigkeit und Empfindlichkeit aufweisen, damit auch bei großen Strahldosen die gebildeten Substanzmengen sicher kontrolliert werden können.

Die wohl empfindlichste Meßmethode zur Bestimmung von Konzentrationsänderungen von Elektrolyten, besonders für Konzentrationen, die für die Untersuchung der Wirkung von Röntgenstrahlen gerade in Frage kommen, ist die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit.

Bekanntlich ist das elektrische Leitvermögen oder die spezifische Leitfähigkeit eines Elektrolyten definiert durch den reziproken Wert des Widerstandes in Ohm, den ein Würfel von 1 cm Kantenlänge dieses Elektrolyten bei 18° Celsius aufweist. Die Einheit der spezifischen Leitfähigkeit K ist also das $\text{Ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$.

Bei sorgfältiger Arbeitsweise ist die Messung der elektrischen Leitfähigkeit sehr genau und arbeitet außerordentlich schnell, was sehr wichtig ist wegen der Kleinheit der gebildeten Stoffmengen und der damit verbundenen Gefahr der Veränderung durch äußere Einflüsse.

Die dabei notwendigen Vorsichtsmaßregeln betreffen insbe-

sondere das Verhindern der Verunreinigung der zu messenden Lösung durch irgendwelche Elektrolyte, da die Leitfähigkeit nicht nur durch Säuren oder Basen wie die pH-Messung verändert wird, sondern natürlich auch auf neutrale Salze reagiert.

Als Anzeigegerät und gleichzeitig als Meßbrücke diente ein Philips-Instrument („Philoskop“), welches gestattet, Widerstände zwischen 0,1—10 000 000 Ohm zu messen, wobei eine Widerstandsänderung von 1 % noch sicher erfaßt werden kann. Bei jedem Versuch wurden drei Messungen ausgeführt und daraus der Mittelwert berechnet. Als Spannungsquelle verwendeten wir einen Philips-Wechselspannungsgenerator von 1000 Hz. und 3 V. Das Elektrodensystem bestand aus zwei festen, ca. 1 cm² großen Platin-Elektroden, welche fest in Glas eingeschmolzen waren. Die Widerstandskapazität betrug bei dem verwendeten System $C = 1,45$; somit mußten die gemessenen Widerstände der Versuchslösungen mit diesem Faktor multipliziert werden. Als Meßgefäß diente eine beidseitig offene Glasröhre von genügender Weite, die auf der Unterseite mit einem Cellophanblatt verschlossen war, das zuerst mit Leitungs-, dann mit destilliertem Wasser gewaschen wurde. Großes Gewicht wurde nicht nur auf eine sehr exakte Arbeitsweise gelegt, sondern besondere Aufmerksamkeit mußte auch der Arbeit mit möglichst sauberen Gefäßen und Geräten geschenkt werden.

Scheidetrichter, Pipetten und Bestrahlungsgefäße wurden solange mit destilliertem Wasser gewaschen, bis die Spülflüssigkeit einen genügend hohen Widerstand aufwies; hierauf kamen sie zum Trocknen in den Trockenschrank bei einer Temperatur von 70—80° Celsius.

Vorbedingung zur Erzielung guter Versuchsergebnisse war eine genügende Reinheit des zur Herstellung von gesättigten Lösungen verwendeten Wassers, d. h. Wasser, das praktisch keine Elektrolyte mehr enthielt und mindestens einen spezifischen Widerstand von 500 000 Ohm cm aufweist. Dies wurde meistens nach dreimaligem Destillieren erreicht.

Da aber auch die Ausgangslösung einen genügend hohen Widerstand aufweisen sollte, mußten die Substanzen, die in vorliegender Arbeit alles Flüssigkeiten waren, ein bis mehrere Male gewaschen werden.

Dies geschah, indem von der betreffenden Substanz mit Hilfe einer Pipette in einen ca. 200 cm³ fassenden Scheidetrichter gebracht wurde, worin sich schon ca. 100 cm³ sehr gut destilliertes Wasser befanden. Der Trichter wurde verschlossen und der Inhalt während 15 Minuten intensiv durchgeschüttelt. Darauf wurde der Quarzkolben während einiger Zeit ruhig gestellt, bis eine vollständige Trennung der gesättigten Lösung und der überflüssigen Substanz erfolgt war, worauf diese in eine bereitgestellte Schale abgelassen werden konnte, da die Lösung spezifisch leichter war als die zu lösende Substanz und sich erstere deshalb am Boden des Gefäßes ansammelte. Einige cm³ der Lösung wurden zur Kontrolle des Widerstandes einer Messung unterzogen.

Das Reinigen von zu untersuchenden Substanzen gelang aber nur, wenn diese schwer löslich waren. Folgende Substanzen eigneten sich nicht zu Versuchen, da sie nach ein- oder zweimaligem Waschen vollständig aufgelöst, der Widerstand aber noch viel zu klein war (nicht über 100 000 Ohm); oder trotz sorgfältigstem Vorgehen war es auch nach 20—30 Waschungen nicht möglich, einen genügend hohen Widerstand zu erlangen:

1. Dichlormethylen (cis)
2. Dichlormethylen (trans.)
3. Amylchlorid (normal)
4. Amylchlorid (tert.)
5. Äthylbromid
6. Methylenchlorid

Sobald der Widerstand der gesättigten Lösungen der verwendbaren Substanzen den Anforderungen entsprach, wurden 20 cm³ in eine Quarzschale gebracht und mit der Bestrahlung konnte begonnen werden. Eine weitere gleiche Menge wurde abgelassen, machte alle Operationen mit Ausnahme der Bestrahlung mit und diente als Kontrolle. Ihre Leitfähigkeit wurde am Anfang und am Schluß des eigentlichen Versuches gemessen.

Für die Bestrahlung stand uns ein Philips-Kontakt-Therapieapparat zur Verfügung, der bei einer Röhrenspannung von 50 KV und einem Röhrenstrom von 2 mA eine Oberflächenintensität von 6 900 r/min. lieferte.

Der Meniscus der Versuchslösung in der Quarzschale wurde der Röntgenröhre bis auf 2 mm genähert. Alle Bestrahlungen wurden unter den gleichen Bedingungen ausgeführt.

Nach den Messungen von *L. F. Lamerton* (6) ergab sich bei 20 cm³ Inhalt des Bestrahlungsgefäßes eine mittlere Strahlenintensität von 2 675 r/min. und bei 10 cm³ eine solche von 3 325 r/min.

4. Besprechung der Versuchsergebnisse

A. Die Strahlenhydrolyse von Bromoform (CHBr₃)

Versuch I

Eine gesättigte Lösung von Bromoform wurde der Einwirkung von verschiedenen Röntgenstrahlendosen unterworfen und anschließend die Änderung des spezifischen Widerstandes gemessen.

In allen Versuchen wurde die Lösung unter denselben Verhältnissen hergestellt, so daß keine wesentlichen Unterschiede in den verwendeten Ausgangslösungen vorhanden waren.

Die Resultate sind in Tabelle 1 wiedergegeben (siehe auch Abbildung 1 obere Kurve).

In den Tabellen wurde der Einfachheit und Übersicht wegen bei den Kolonnen: Widerstand, nur der errechnete Mittelwert von den 3—5 gemachten Messungen angegeben.

Tabelle 1: Änderung der spezifischen Leitfähigkeit einer gesättigten Lösung von Bromoform durch Einwirkung von Röntgenstrahlen bei Zimmertemperatur (18° Celsius).

Spezifischer Widerstand der gesättigten Lösung vor der Bestrahlung in Ohm	Spezifischer Widerstand der gesättigten Lösung nach der Bestrahlung in Ohm	Bestrahlungszeit	Zunahme der spezi- fischen Leitfähigkeit M Ohm ⁻¹ cm ⁻¹
520 000	120 000	1'	4,45
450 000	70 000	2 1/2'	8,97
390 000	40 000	5'	15,5
440 000	28 000	7 1/2'	23,1
500 000	23 000	10'	28,8
430 000	18 000	12 1/2'	36,6

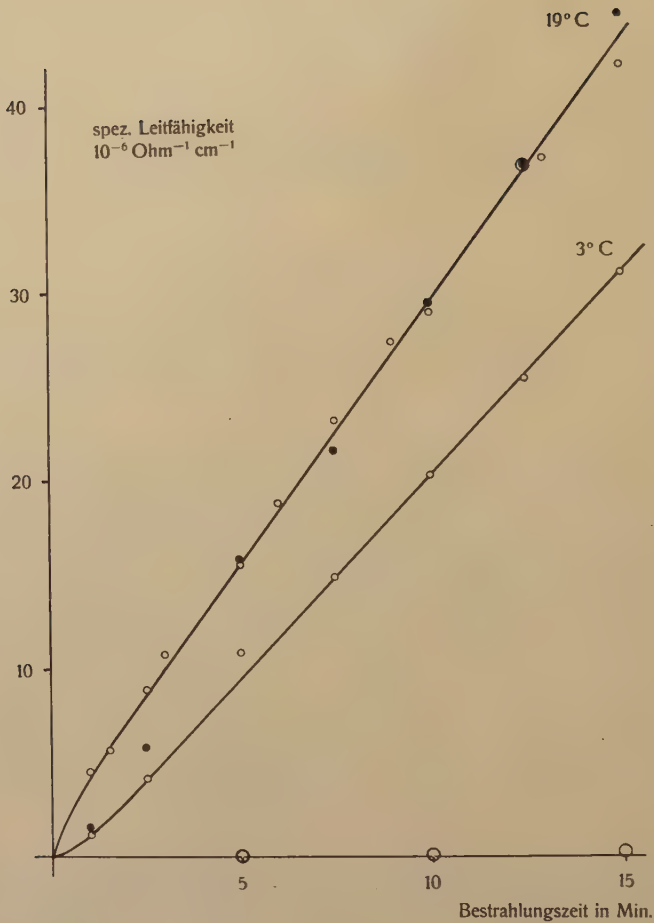


Abb. 1. Änderung der spezifischen Leitfähigkeit einer gesättigten wässrigen Lösung von Bromoform bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen:

1. Bei Zimmertemperatur = obere Kurve, leere Kreise. 2. Bei 2—5° Celsius = untere Kurve. 3. Auf 19° Celsius korrigierte Werte von Messungen bei 2—5° Celsius = obere Kurve, ausgefüllte Kreise. 4. In fester Phase = große leere Kreise auf Abszisse.

Tabelle 2: Zur Kontrolle wurde eine zweite Versuchsreihe unter den genau gleichen Voraussetzungen durchgeführt, mit Ausnahme der Bestrahlungszeiten, resp. Strahlendosen, die gegenüber dem ersten Versuch etwas variiert wurden (Zimmertemperatur 19⁰ Celsius).

Spezifischer Widerstand der gesättigten Lösung vor der Bestrahlung in Ohm	Spezifischer Widerstand der gesättigten Lösung nach der Bestrahlung in Ohm	Bestrahlungszeit	Zunahme der spezi- fischen Leitfähigkeit M Ohm ⁻¹ cm ⁻¹
510 000	100 000	1 ^{1/2} '	5,6
510 000	57 000	3'	10,8
510 000	34 000	6'	18,9
510 000	24 000	9'	27,3
510 000	18 000	13'	36,9
510 000	16 000	15'	41,7

Mit der Strahlendosis erfolgt ein stetiger Anstieg der spezifischen Leitfähigkeit, bewirkt durch eine entsprechende Zunahme der Bromwasserstoffkonzentration, der sehr angenähert proportional der Strahlenmenge verläuft. Das Verhältnis der pro Dosis-einheit gebildeten Bromwasserstoffmenge ist annähernd konstant. Ein sicher linearer Anstieg mit der Röntgenstrahlendosis ist oberhalb einer Bestrahlungszeit von 2 Minuten vorhanden. Unterhalb dieser Dosis ist die Proportionalität vielleicht nicht mehr streng vorhanden, insbesondere bei den Ergebnissen des Versuches II, die als untere Kurve ebenfalls in Abb. 1 eingetragen sind.

Daß die gemessene Veränderung der spezifischen Leitfähigkeit sicher auf die Bildung von Bromwasserstoff zurückzuführen ist, konnte durch die Probe mit AgNO₃ bei genügend lang bestrahlten Lösungen nachgewiesen werden.

Versuch II

Wiederum wurde eine gesättigte Lösung von Bromoform mit verschiedenen Dosen bestrahlt, jedoch bei Bestrahlungstemperaturen zwischen 2—5⁰ Celsius (durchschnittlich 3⁰ C). Die Resultate sind in Tabelle 3 wie auch in Abb. 1 wiedergegeben.

Tabelle 3

Spez. Widerstand der gesättigten Lösung vor der Bestrahlung in Ohm	Spez. Widerstand der gesättigten Lösung nach der Bestrahlung in Ohm	Bestrahlungszeit	Zunahme der spezifischen Leitfähigkeit M Ohm ⁻¹ cm ⁻¹	Korrigierte Werte für Zimmertemperatur M Ohm ⁻¹ cm ⁻¹
410 000	290 000	1'	1,1	1,6
570 000	130 000	2 ¹ / ₂ '	4,1	5,9
480 000	57 000	5'	10,9	15,8
510 000	42 000	7 ¹ / ₂ '	14,8	21,5
390 000	31 000	10'	20,1	29,2
510 000	26 000	12 ¹ / ₂ '	25,2	36,6
410 000	22 500	15'	30,8	44,5

Versuch III

Hier wurde eine gesättigte Lösung von Bromoform in gefrorenem Zustand bestrahlt, danach aufgetaut und der Widerstand gemessen. Die Resultate sind in Tabelle 4 zur Darstellung gebracht.

Tabelle 4

Spezif. Widerstand der gesättigten Lösung vor der Bestrahlung in Ohm bei Zimmertemperatur	Spezif. Widerstand der gesättigten Lösung nach der Bestrahlung in Ohm bei Zimmertemperatur	Bestrahlungszeit	Zunahme der spezifischen Leitfähigkeit M Ohm ⁻¹ cm ⁻¹
510 000	500 000	5'	0
510 000	420 000	10'	0,2
510 000	390 000	15'	0,3

Diese Resultate zeigen, daß in festem Zustand keine sichere Strahlenhydrolyse eintritt. Besonders eindringlich wird diese Feststellung bei einem Vergleich der vorstehenden Resultate mit denen der Versuche mit flüssigen Lösungen bei gleichen Bestrahlungszeiten.

Versuch IV

In der ersten Versuchsreihe wurden 2 cm³ reines Bromoform in flüssigem Zustand 5, 10 und 15 Minuten bestrahlt, hierauf in 50 cm³ destilliertem Wasser ausgeschüttelt. Die dabei erzielten Resultate sind aus Tabelle 5 ersichtlich.

Tabelle 5

Spezifischer Widerstand des destillierten H ₂ O in Ohm	Spezifischer Widerstand der Lösung (bestehend aus 2 cm ³ Bromoform + 50 cm ³ H ₂ O	Bestrahlungszeit	Zunahme der spezi- fischen Leitfähigkeit M Ohm ⁻¹ cm ⁻¹
540 000	270 000	5'	23,6
540 000	14 000	10'	48,0
550 000	9 000	15'	75,3

In der zweiten Versuchsreihe wurden 2 cm³ reines Bromoform in festem Zustand mit den gleichen Dosen bestrahlt, dann aufgetaut und ebenfalls mit 50 cm³ destilliertem Wasser extrahiert. Die bei diesen Versuchen erhaltenen Resultate sind in Tabelle 6 dargestellt. Sowohl bei der ersten wie bei der zweiten Versuchsreihe fanden die Messungen bei einer Zimmertemperatur von 20° C statt.

Tabelle 6

Spezifischer Widerstand des destillierten H ₂ O in Ohm	Spezifischer Widerstand der Lösung	Bestrahlungszeit	Zunahme der spezi- fischen Leitfähigkeit M Ohm ⁻¹ cm ⁻¹
580 000	200 000	5'	3,5
570 000	70 000	10'	10,0
570 000	35 000	15'	17,0

Bei dem Versuch mit dem flüssig bestrahlten, reinen Bromoform ist offensichtlich ein Strahleneffekt vorhanden, der auf die Entstehung von Bromwasserstoff zurückzuführen ist. Das experimentelle Vorgehen war folgendermaßen: Das wasserfreie Bromoform wurde nach der Bestrahlung mit Wasser extrahiert; dabei wurde freies Brom zu Bromion (Br⁻) reduziert. Daraus resultierte folgendes:



Die Braunfärbung, die bei dem bestrahlten Bromoform festgestellt werden konnte, ist sicher auf freies Brom zurückzuführen.

Bei der Versuchsreihe mit reinem Bromoform, in festem Zustand bestrahlt, ist offenbar ebenfalls ein Effekt da, dessen Aus-

maß aber nur ca. $\frac{1}{5}$ von demjenigen bei flüssig bestrahltem Bromoform beträgt (vgl. Abbildung 2). Möglicherweise ist dabei der Mechanismus ein anderer, d. h. es tritt die Vermutung auf, daß in diesem Fall der Strahleneffekt nicht an eine freie Beweglichkeit der Moleküle gebunden ist.

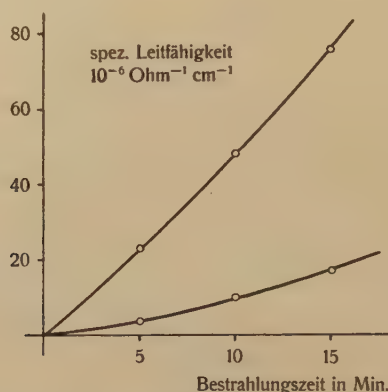


Abb. 2. Änderung der spezifischen Leitfähigkeit von 2 cm³ reinem Bromoform, in flüssigem Zustand bestrahlt (= obere Kurve), und von 2 cm³ reinem Bromoform in festem Zustand bestrahlt (= untere Kurve), nach Extraktion mit 50 cm³ destilliertem Wasser.

Unerwähnt darf allerdings die Möglichkeit nicht bleiben, daß im zweiten Versuch mit festem Bromoform ein Teil der Substanz vielleicht schon in die flüssige Phase übergegangen war und daraus eine Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit resultieren konnte.

Allerdings wurden die 2 cm³ Bromoform nach 5 Minuten Bestrahlung sofort wieder unter eine Glasglocke an die Außentemperatur gebracht (die zwischen -3°C und -5°C schwankte), da der Philips-Kontakt-Therapieapparat nach 5 Minuten bestrahlen mindestens 5 Minuten abgeschaltet und gekühlt werden mußte.

Eindeutig geht aber aus diesem Versuch hervor, daß das Ausmaß der Strahlenwirkung in flüssiger Phase sehr viel größer ist als in fester, in Übereinstimmung mit den Resultaten aus den Versuchen I—II.

B. Die Strahlenhydrolyse von Methylenchlorid

Ähnlich wie bei Bromoform wurde hier mit Methylenchlorid eine gesättigte Lösung verschieden hohen Röntgenstrahlendosen ausgesetzt. Bei diesem Versuch herrschte eine Zimmertemperatur von 19°C . Die Zunahme der spezifischen Leitfähigkeit ist in Tabelle 7 und Abbildung 3 ersichtlich.

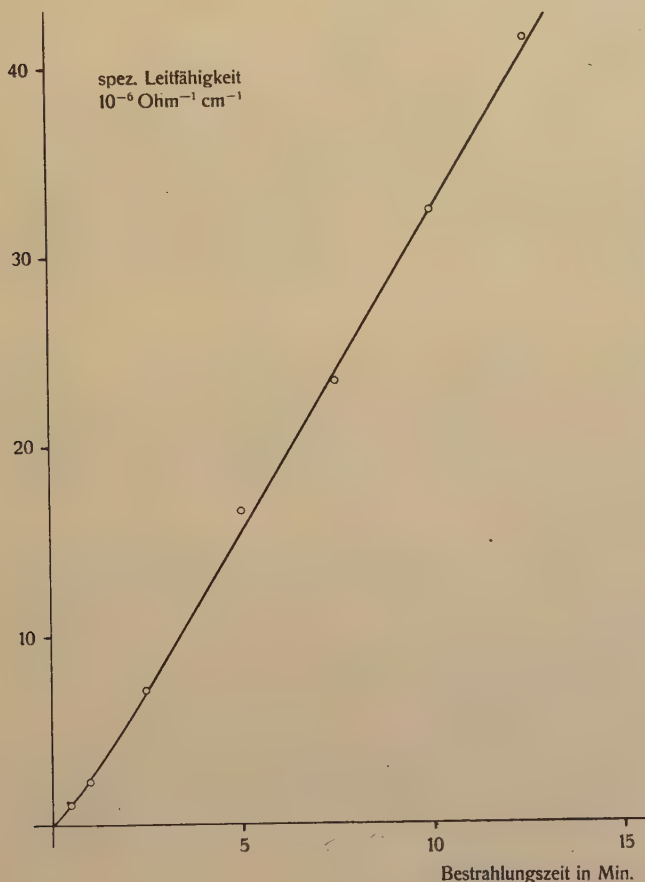


Abb. 3. Änderung der spezifischen Leitfähigkeit einer gesättigten wässrigen Lösung von Methylenchlorid bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen (bei Zimmertemperatur).

Tabelle 7

Spezifischer Widerstand der gesättigten Lösung vor der Bestrahlung in Ohm	Spezifischer Widerstand der gesättigten Lösung nach der Bestrahlung in Ohm	Bestrahlungszeit	Zunahme der spezi- fischen Leitfähigkeit M Ohm ⁻¹ cm ⁻¹
500 000	260 000	1/2'	1,15
630 000	175 000	1'	2,3
500 000	80 000	2 1/2'	7,2
630 000	39 000	5'	16,6
630 000	28 000	7 1/2'	23,5
630 000	20 500	10'	32,5
500 000	16 000	12 1/2'	41,6

Auch hier erfolgt vielleicht der lineare Anstieg mit der Strahlendosis erst nach ca. 21/2 Minuten Bestrahlungsdauer. Bis zu diesem Punkt scheint die gebildete Substanzmenge geringer, was auch im Verlauf der Kurve in Abbildung 3 zum Ausdruck kommt.

C. Die Strahlenwirkung auf Aceton (CH₃-CO-CH₃)

In dieser Reihe von Versuchen wurde zum Schlusse noch eine 5 % ige Lösung von Aceton bestrahlt (100 cm³ destilliertes H₂O + 5,25 cm³ Aceton).

Es wurden zur Kontrolle zwei Versuche angestellt, deren Resultate in der gleichen Tabelle 8 und in Abbildung 4 dargestellt sind.

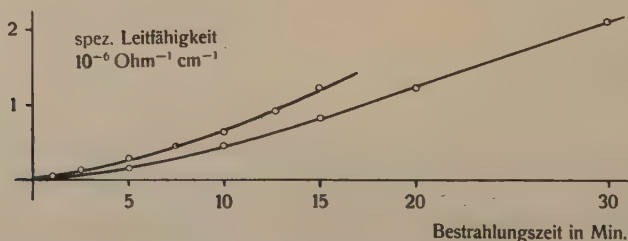


Abb. 4. Änderung der spezifischen Leitfähigkeit einer 5%igen Lösung von Aceton in Wasser bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen. (Untere Kurve entspricht Resultaten mit *.)

Die Bestrahlungszeiten vom ersten Versuch sind:

1' 2½' 5' 7½' 10' 12½' 15'

Im zweiten Versuch wurden die Zeiten bis auf das Doppelte gesteigert (mit *):

1' 5' 10' 15' 20' 30'

Bei diesen Versuchen herrschte eine Zimmertemperatur von 19° C.

Tabelle 8

Spezifischer Widerstand der 5%igen Lösung vor der Bestrahlung in Ohm	Spezifischer Widerstand der 5%igen Lösung nach der Bestrahlung in Ohm	Bestrahlungszeit	Zunahme der spezi- fischen Leitfähigkeit M Ohm ⁻¹ cm ⁻¹
600 000	580 000	1'	0,08
700 000	670 000		0,03 *
600 000	550 000	2½'	0,14
600 000	500 000		0,27
700 000	580 000	5'	0,19 *
600 000	440 000	7½'	0,46
600 000	390 000		0,62
700 000	470 000	10'	0,47 *
600 000	345 000	12½'	0,89
600 000	290 000	15'	1,23
700 000	380 000		0,82 *
650 000	340 000	20'	1,2 *
650 000	220 000	30'	2,08 *

Wie aus den Resultaten ersichtlich ist, ergibt sich bei Aceton nur eine geringe Vergrößerung der spezifischen Leitfähigkeit, die vielleicht auf die Bildung von Essigsäure zurückzuführen ist. Es scheint möglich, daß diese unter gleichzeitiger Einwirkung von Luftsauerstoff entstanden ist.

D. Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit K von der Temperatur

Eine andere Reihe von Versuchen beschäftigte uns betreffs Ermittlung der Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von der Temperatur. Diese Versuchsreihe diente dem Zweck, den Korrekturfaktor für die Versuche I und II zu ermitteln, d. h. die

Umrechnung der bei 30 °C gemessenen Leitfähigkeit einer gesättigten wässrigen Lösung von Bromoform auf Zimmertemperatur zu ermöglichen. Die auf diese Weise erzielten Werte sind in Abbildung 1 eingetragen.

Ein erster Versuch wurde mit destilliertem Wasser von genügender Reinheit (480 000 Ohm) durchgeführt, wobei der Widerstand bei den verschiedenen Temperaturen gemessen wurde. Die Resultate sind in Tabelle 9 und Abbildung 5 wiedergegeben.

Tabelle 9

Temperatur in °C	Gemessener Widerstand in Ohm	Spezifische Leitfähigkeit K	$\frac{\Delta K}{4} = \text{Spezifische}$ Leitfähigkeit pro °C	$\frac{\Delta K/4}{K} = \%$
4	730 000	0,94	0,018	0,018
8	680 000	1,01	0,03	0,028
12	610 000	1,13	0,048	0,039
16	520 000	1,32	0,078	0,053
20	420 000	1,63		

Der gleiche Versuch wurde mit schlechterem Wasser durchgeführt, das einen Widerstand von ca. 100 000 Ohm aufwies. Die in diesen Versuchen erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 10 und Abbildung 5 dargestellt.

Tabelle 10

Temperatur in °C	Gemessener Widerstand in Ohm	Spezifische Leitfähigkeit K	$\frac{\Delta K}{4} = \text{Spezifische}$ Leitfähigkeit pro °C	$\frac{\Delta K/4}{K} = \%$
0	150 000	4,60	0,038	0,008
4	145 000	4,75	0,043	0,009
8	140 000	4,92	0,095	0,018
12	130 000	5,30	0,110	0,02
16	120 000	5,74	0,135	0,022
20	110 000	6,27		

Ein dritter Versuch wurde mit einer Kochsalzlösung durchgeführt, die einen Widerstand von 29 000 Ohm aufwies. Die erzielten Resultate können aus Tabelle 11 und Abbildung 5 ersehen werden.

Tabelle 11

Temperatur in ° C	Gemessener Widerstand in Ohm	Spezifische Leitfähigkeit K	$\frac{\Delta K}{4}$ = Spezifische Leitfähigkeit pro ° C	$\frac{\Delta K/4}{K} = \%$
4	33 000	20,9		
8	32 000	21,6	0,18	0,009
12	31 000	22,2	0,15	0,007
16	30 000	23,0	0,2	0,009
20	28 000	24,6	0,4	0,017

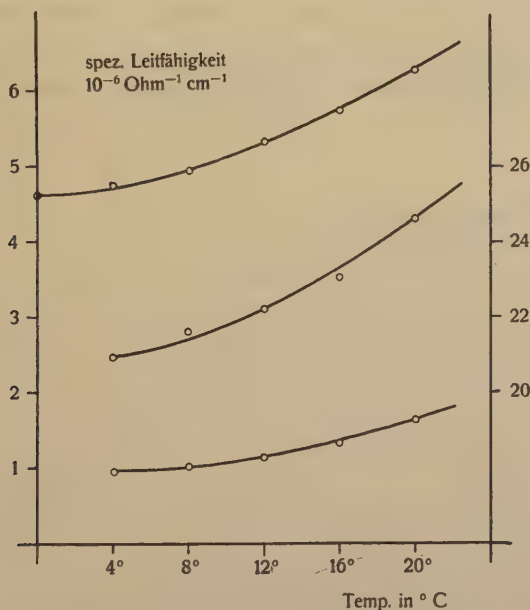


Abb. 5. Die spezifische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Oberste Kurve: Für Wasser mit niedrigem Widerstand. Mittlere Kurve: Für Kochsalzlösung. Unterste Kurve: Für Wasser von höherem Widerstand. (Die Ordinate rechts gehört zur mittleren Kurve.)

Mit der Temperatur steigt auch die spezifische Leitfähigkeit an, jedoch nicht linear, sondern die Erhöhung von K ist größer. Sie liegt ca. zwischen 1—2 % pro ° C. Wie aus den Tabellen er-

sichtlich ist, sind die Veränderungen gering. Die Widerstandsänderung ist auf die Erhöhung der Ionenbeweglichkeit zurückzuführen.

E. Selbstdissoziation von Isopropylbromid

Ein letzter Versuch wurde mit Isopropylbromid gemacht. Es wurde eine gesättigte Lösung von der Substanz hergestellt und diese bei Zimmertemperatur (20°C) sich selbst überlassen. In bestimmten Zeitabständen wurde der Widerstand gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 und Abbildung 6 zur Darstellung gebracht. Der Zweck des vorstehenden Versuches war die Kontrolle der Selbstdissoziation im Vergleich zu der Strahlenhydrolyse.

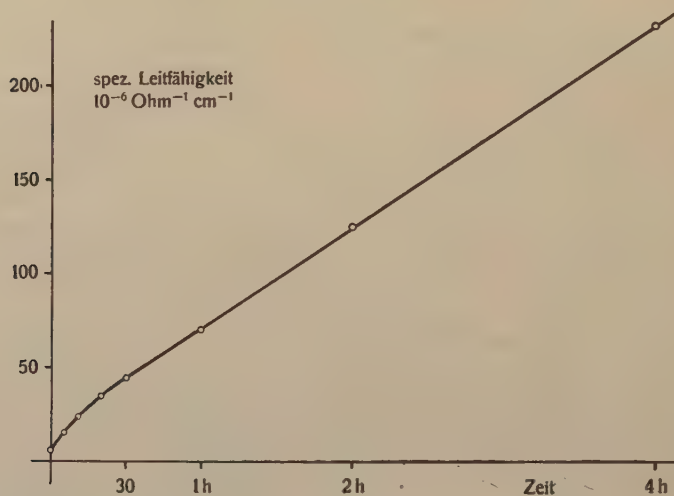


Abb. 6. Selbstdissoziation von Isopropylbromid bei Zimmertemperatur (20°Celsius).

Wie aus der Kurve in Abbildung 6 ersichtlich ist, steigt die spezifische Leitfähigkeit, mit andern Worten die umgesetzte Substanzmenge erst oberhalb einer Bestrahlungszeit von 20 Minuten linear an. Unterhalb dieser Grenze ist sie größer.

Tabelle 12

Zeit	Gemessener Widerstand der gesättigten Lösung	Zunahme der spezifischen Leitfähigkeit
0'	120 000	5,7
5'	50 000	13,8
10'	30 000	23,0
20'	20 000	34,5
30'	15 000	45,9
1 Std.	9 500	72,5
2 Std.	5 500	125,3
4 Std.	3 000	229,8

Auf Grund der erzielten Resultate stellen wir fest, daß bei der Strahlendissoziation ein offenbar grundsätzlich gleicher Verlauf herrscht wie bei der Selbstdissoziation.

5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Zweck der vorstehenden Arbeit war die experimentelle Untersuchung des Temperatureffektes auf die Strahlenwirkung an verschiedenen Substanzen in wässriger Lösung. Dieser Ausfall ist von wesentlicher Bedeutung für die theoretische Interpretation der Mechanismen der Strahlenwirkung. Es wurden wässrige Lösungen von Bromoform, Methylenchlorid und Aceton bei verschiedenen Temperaturen steigenden Röntgenstrahlendosen ausgesetzt und das Ausmaß der Strahlenwirkung durch die Bestimmung der Änderung der spezifischen Leitfähigkeit gemessen. Dabei wurden die folgenden Ergebnisse gefunden:

a) Wässrige Lösungen von Bromoform und Methylenchlorid werden durch Röntgenstrahlen verändert unter Bildung von Halogenwasserstoff. Bei genügend hohen Strahlendosen kann derselbe durch Fällung mit AgNO_3 nachgewiesen werden.

b) Unter Einwirkung von Röntgenstrahlen auf eine wässrige Lösung von Aceton wird die spezifische Leitfähigkeit derselben leicht erhöht. Diese Erhöhung ist höchstwahrscheinlich auf die Bildung von Essigsäure unter gleichzeitiger Einwirkung des Luftsauerstoffs zurückzuführen.

c) Die gebildete Menge Halogenwasserstoff steigt mit zunehmender Strahlendosis an, jedoch ist ein linearer Anstieg erst oberhalb 5000—10 000 r vorhanden. Es handelt sich dabei höchstwahrscheinlich um eine Reaktion mit zwei Gliedern, wie sie auch bei andern organischen Halogenverbindungen beobachtet werden konnte.

d) Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit genügt, um die Differenzen des Verlaufes der Strahlenwirkungen zu erklären, mit Ausnahme der Differenzen bei kleinen Strahlendosen.

e) Für die Strahlenhydrolyse mit Bromoform besteht ein geringer Temperatureffekt, der sich bei höhern Temperaturen besonders in der Verflachung des nicht linearen Anfangsstückes der Dosiswirkungskurven äußert. Diese Beobachtung darf als Stütze für die Anschauung eines zweigliedrigen Reaktionsverlaufes angesehen werden.

f) Bromoformlösungen, die in fester Phase (bei an Ort gebundenen Wassermolekülen) bestrahlt wurden, ergaben keine Bildung von Halogenwasserstoff. Die freie Beweglichkeit der Moleküle ist also für die Strahlenreaktion eine unerläßliche Voraussetzung.

g) In trocken bestrahltem Bromoform (d. h. ohne Wasserzusatz) findet ebenfalls eine Spaltung des Moleküls statt, die als freies Brom durch die Braunfärbung sichtbar wird und durch Wasser in Form von Bromwasserstoff extrahiert werden kann. Die Ausbeute ist dabei auf gleiche Bromoformmengen bezogen ca. 20mal geringer als in wässriger Lösung.

h) Bestrahlung von trockenem Bromoform in fester Phase liefert einen sehr bedeutend kleineren Strahleneffekt. Die Ausbeute ist hier mindestens 5mal geringer als in flüssigem Zustand. Auch ohne Wasserzusatz scheint somit die freie Beweglichkeit der Moleküle von sehr wesentlicher Bedeutung zu sein.

i) Die Veränderung der spezifischen Leitfähigkeit von wässrigen Lösungen von Isopropylbromid ist durch eine spontane Hydrolyse dieses Stoffes erklärbar. Diese ist in ihrem Verlauf grundsätzlich ähnlich wie die Strahlenhydrolyse der andern untersuchten Substanzen.

Literaturverzeichnis

1. *Duane, W.* und *O. Scheurer*: Le Radium 10. 33 (1913).
2. *Fricke, H.* und *St. Morse*: Americ. J. Röntg. 18. 426 (1927).
3. *Glocker, R.*: Z. Phys. 46. 764 (1928).
4. *Günther, P.* und *L. Holzapfel*: Z. Phys. Chem. B 44. 374 (1939).
5. *Jüngling, O.*: Lehrb. Strahlentherapie 1936.
6. *Lamerton, F. L.*: Brit. J. Rad. 13. 136 (1940).
7. *Liechti, A., W. Minder* und *F. Wegmüller*: Radiol. Clin. 14. 167 (1945).
8. *Minder, W.*: Radiol. Clin. Suppl. Band 15. 81 (1946).
9. — Schweiz. med. Wochenschr. 77. 194 (1947).
10. *Minder W.* und *A. Liechti*: Exper. 1. 298 (1945).
11. — Exper. 2. 410 (1946).
12. *Risse, O.*: Erg. Physiol. 30. 245 (1930).
13. *Ritter, H.*: Diss. Bern 1946.
14. *Sievert, R.*: Acta Radiol. 22. 237 (1941).
15. *Svedberg, The* und *S. Brohult*: Nature 149. 938 (1939).
16. *Wegmüller, F.*: Diss. phil. II Bern 1942.
17. *Weiß, J.*: Nature 153. 748 (1944).
18. *v. d. Werff, J. T.*: Acta Radiol. 23. 603 (1942).
19. *Wertz, E.*: Strahlenth. 68. 136. 287 (1940).

